



Seminário: Estado da Arte do Armazenamento de Energia e Inserção de Fontes Renováveis Intermitentes

A experiência da Alemanha no Armazenamento de Energia por meio de Hidrogênio

Dra. Cinthya Guerrero
Dr. Ulrich Fischer
Prof. Dr. Hans Joachim Krautz

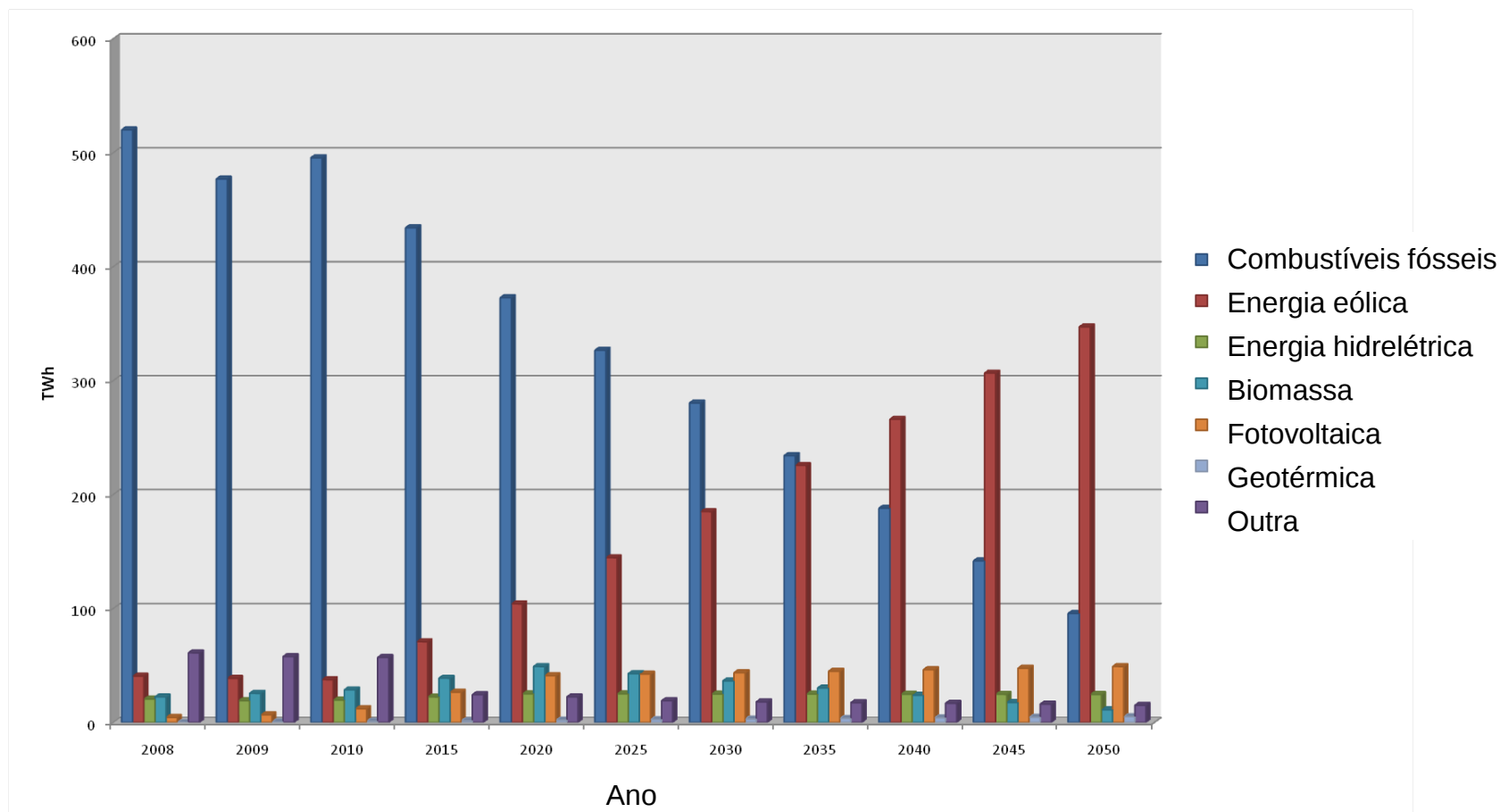
19 e 20 de Março, 2018
São Paulo, Brasil

Conteúdo

1. Implicações da política energética “Energiewende” na Alemanha
2. Rotas de geração e uso de hidrogênio
3. Estado da arte da tecnologia
4. Exemplos de projetos e experiência na Alemanha
5. Desenvolvimento dos aspectos econômicos da tecnologia
6. Eficiência da cadeia de conversão
7. Aspectos principais da pesquisa

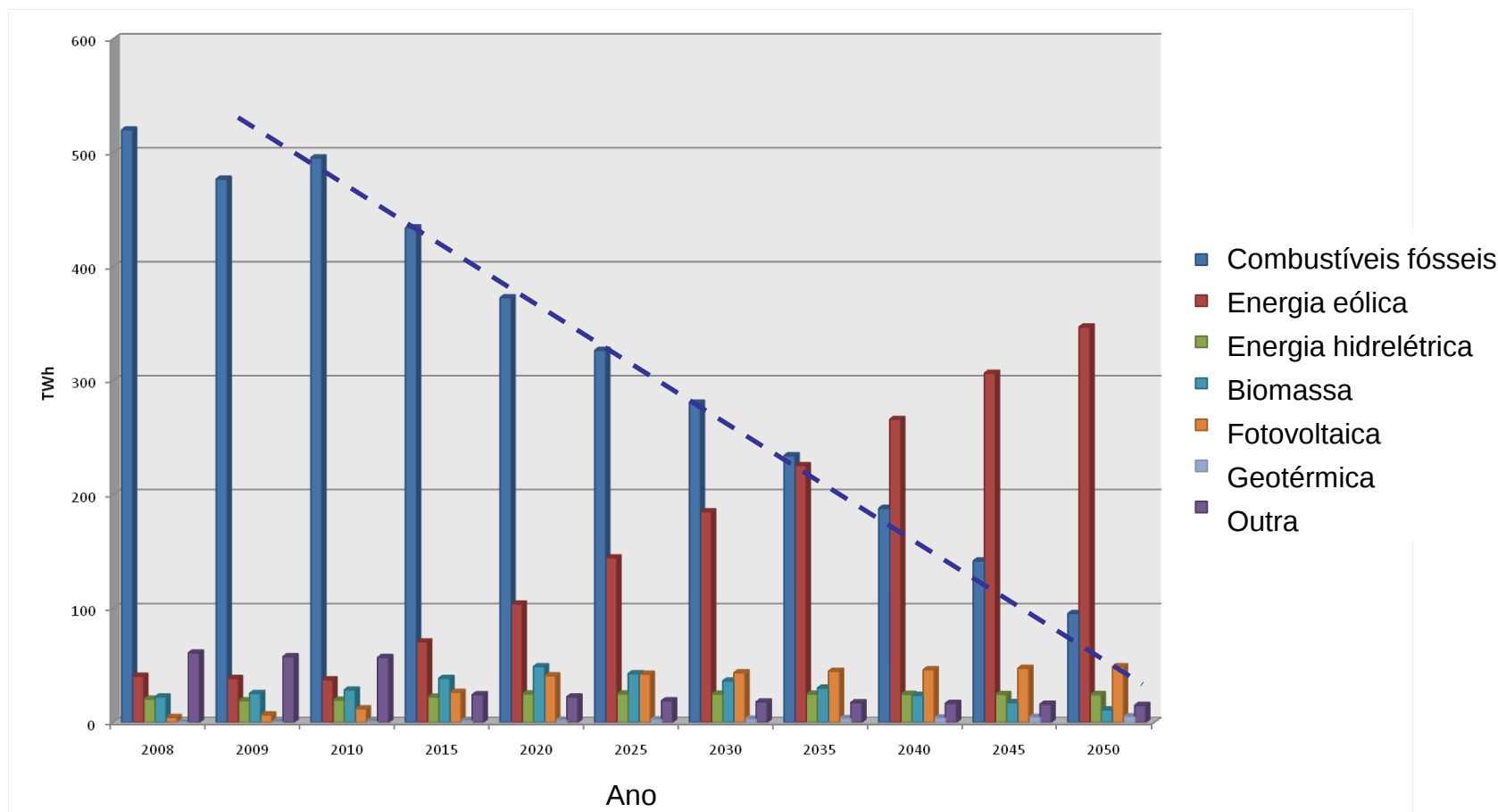
1. Implicações da política energética “Energiewende” na Alemanha

Contribuição de diferentes fontes de energia para a geração de potência bruta - Extrapação linear até 2050



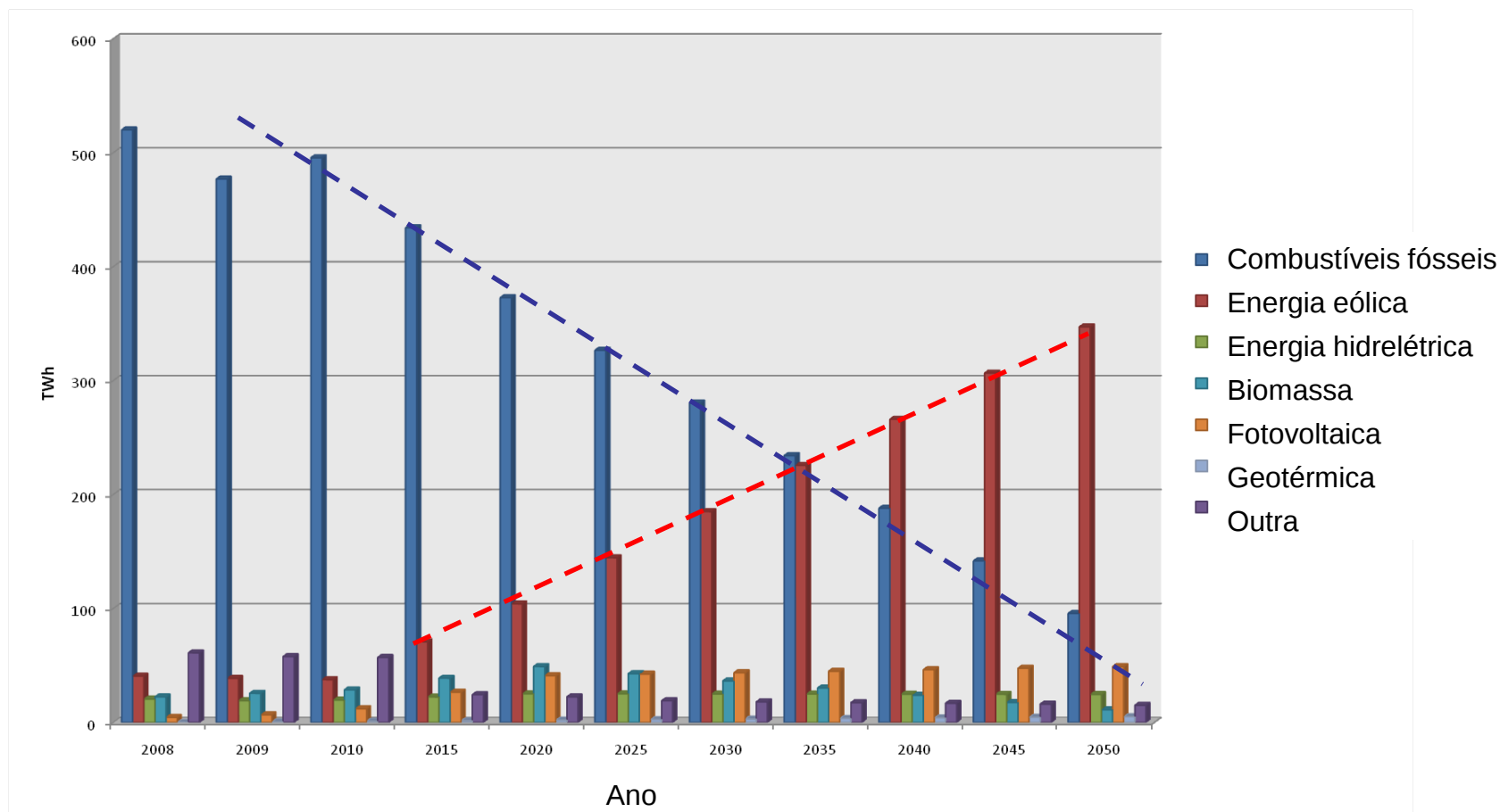
1. Implicações da política energética “Energiewende” na Alemanha

Contribuição de diferentes fontes de energia para a geração de potência bruta - Extrapação linear até 2050



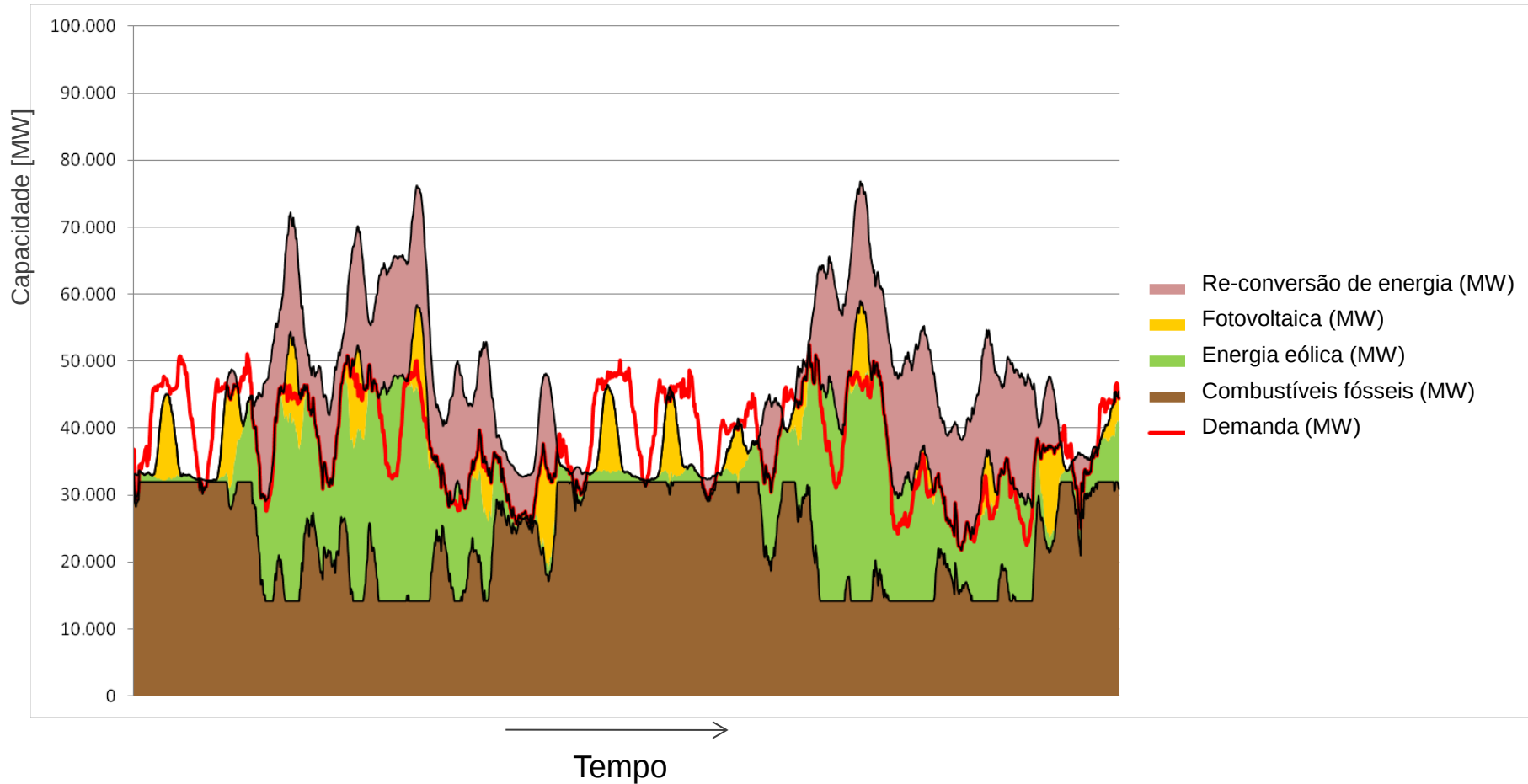
1. Implicações da política energética “Energiewende” na Alemanha

Contribuição de diferentes fontes de energia para a geração de potência bruta - Extrapação linear até 2050



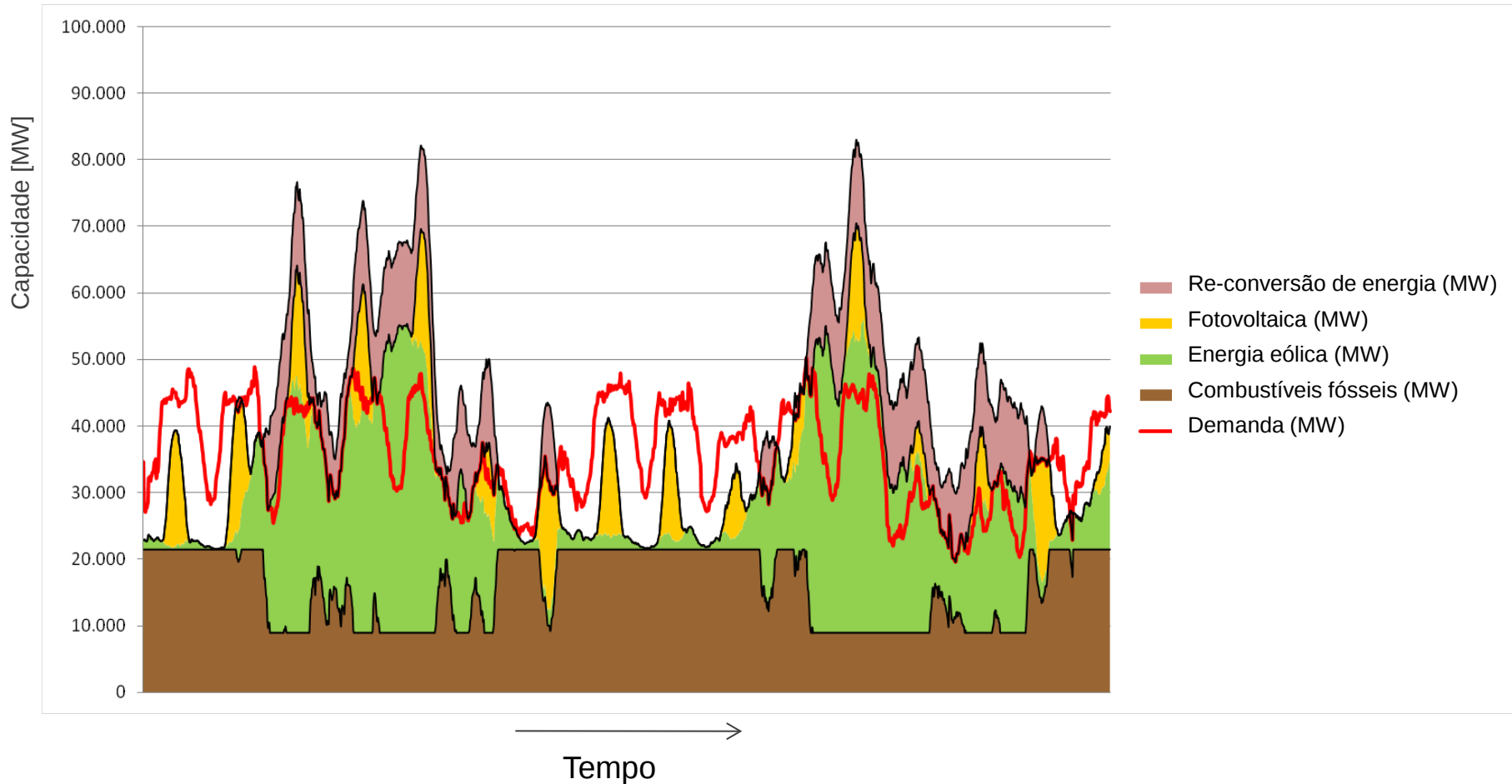
Geração e demanda de energia

Extrapolação linear até 2030



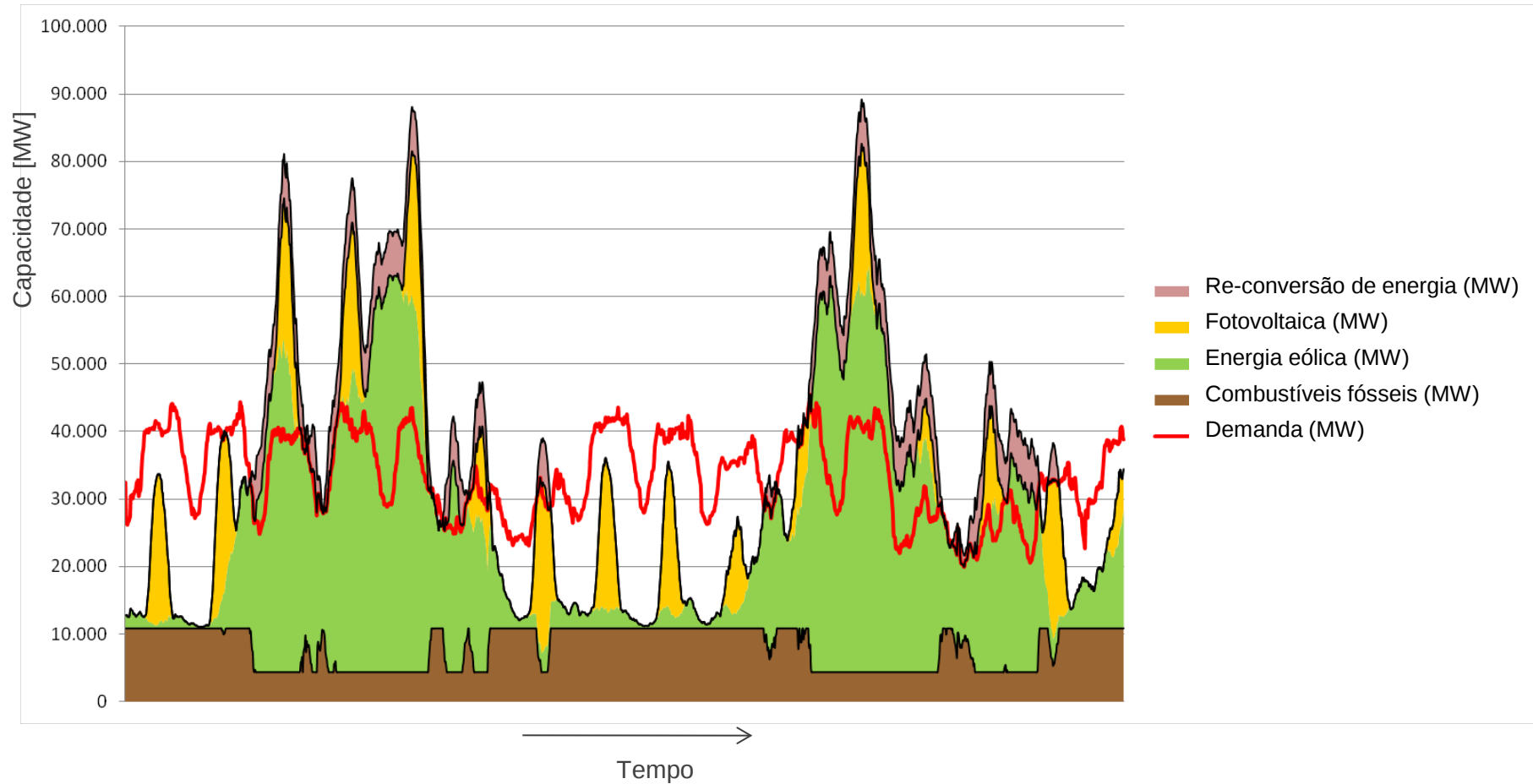
Geração e demanda de energia

Extrapolção linear até 2040

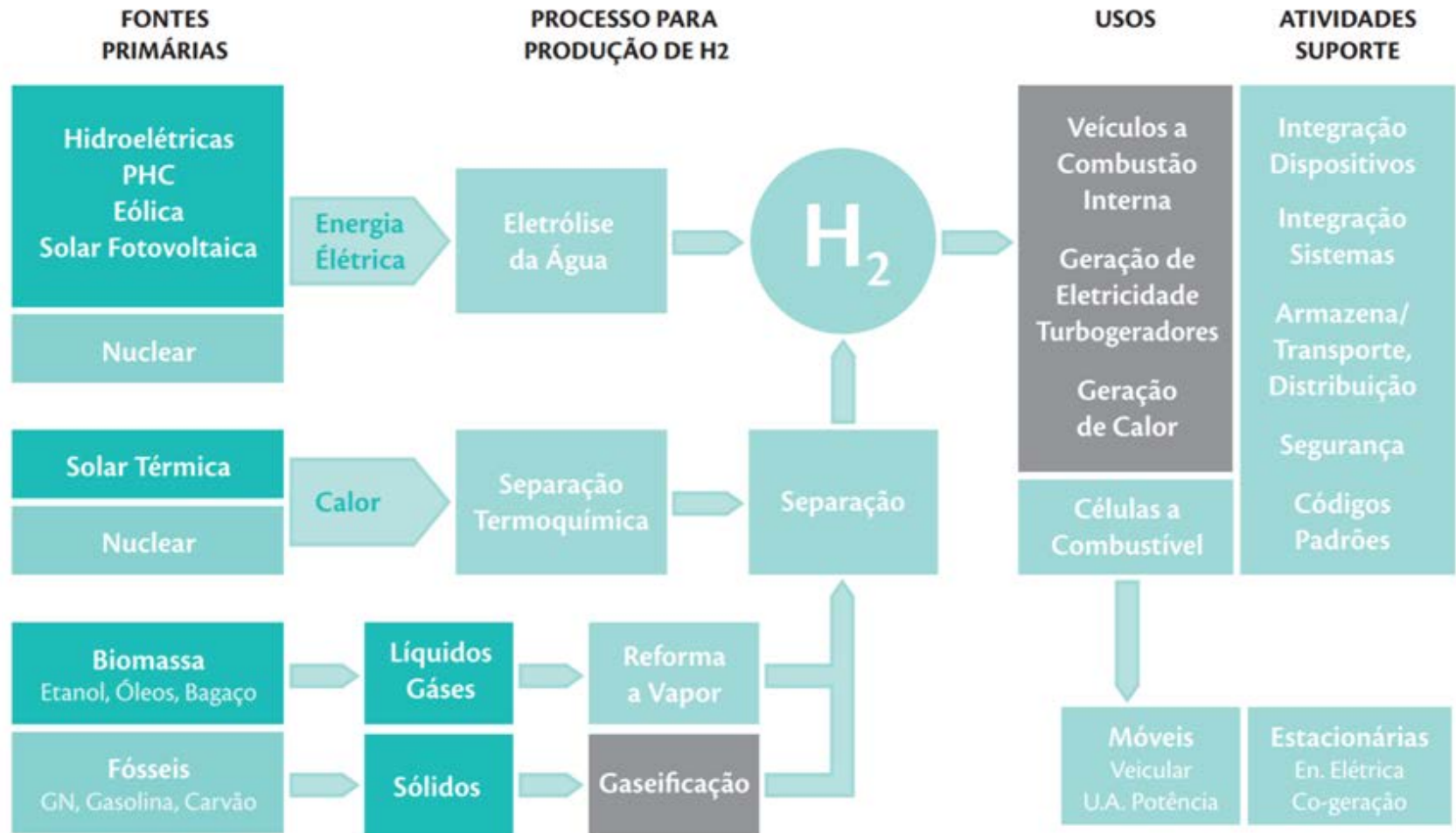


Geração e demanda de energia

Extrapolção linear até 2050

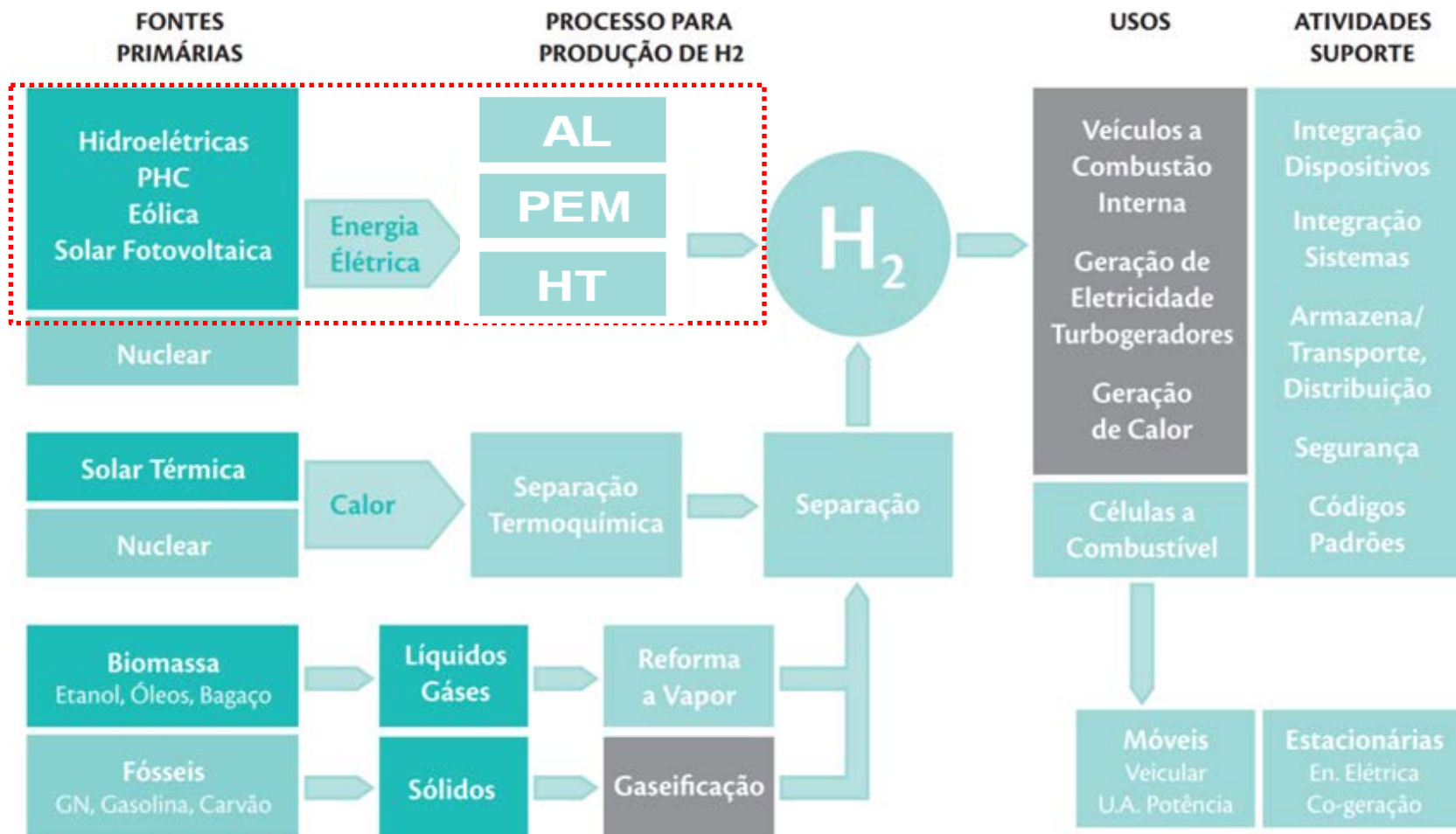


2. Rotas para a geração e uso de hidrogênio



Fonte: CENEH

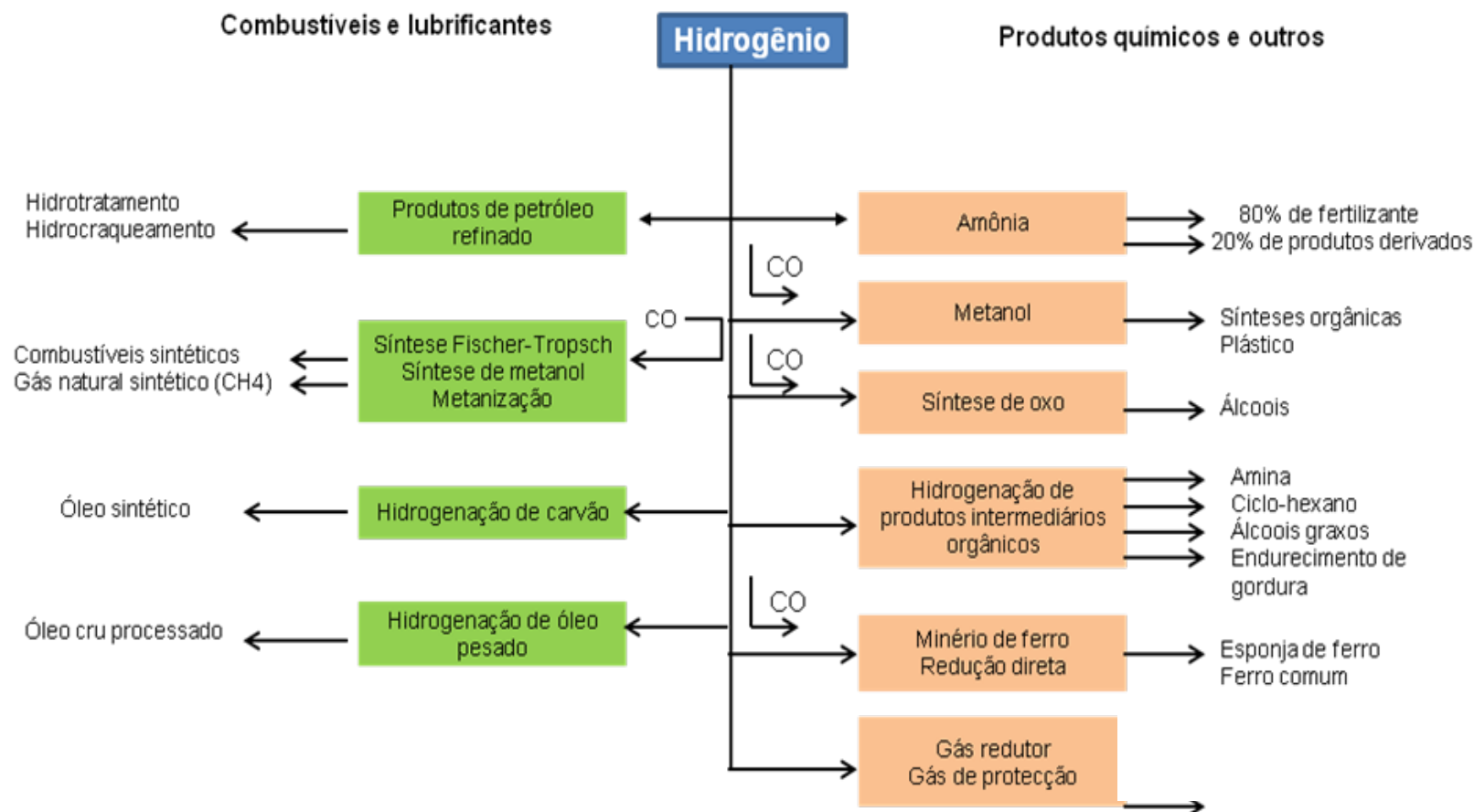
2. Rotas para a geração e uso de hidrogênio



Fonte: CENEH

Hidrogênio como matéria-prima (indústria química, indústria siderúrgica)

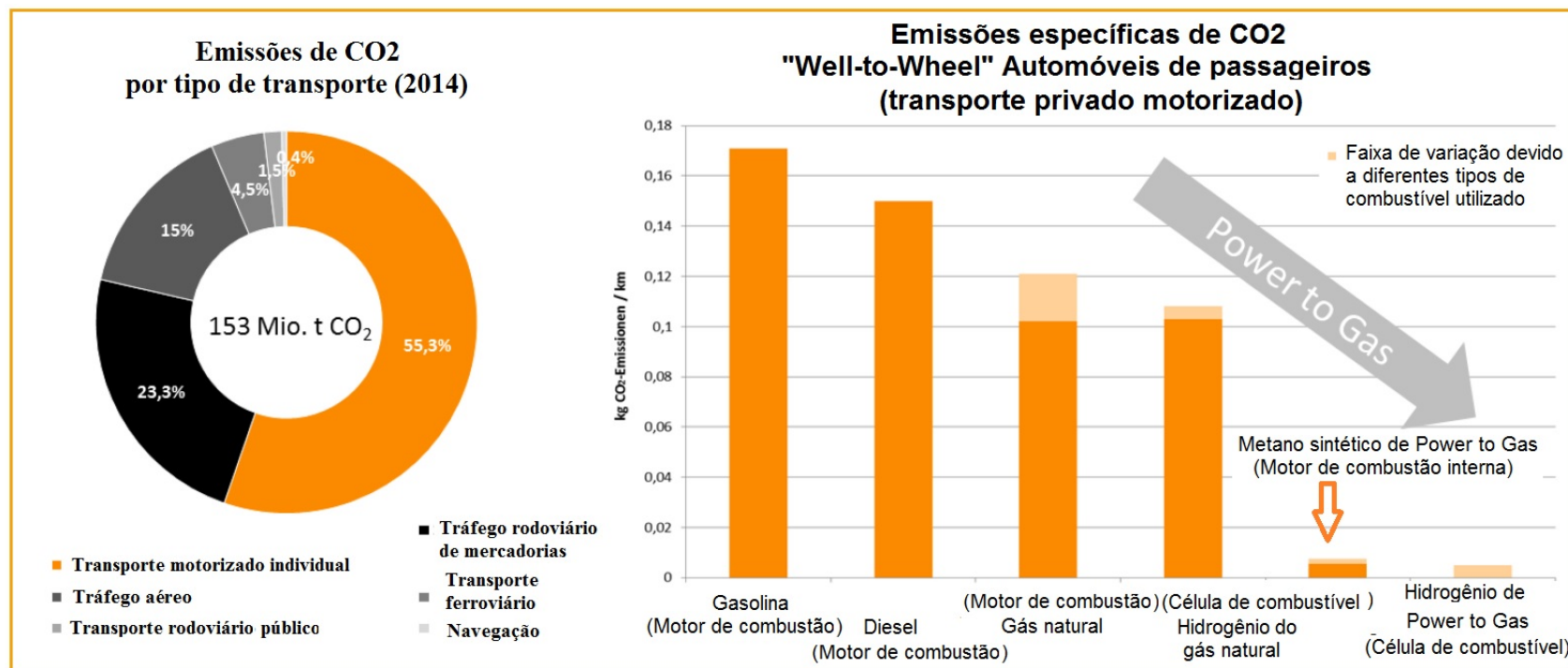
Usos do hidrogênio fora do setor energético



Fonte: DENA

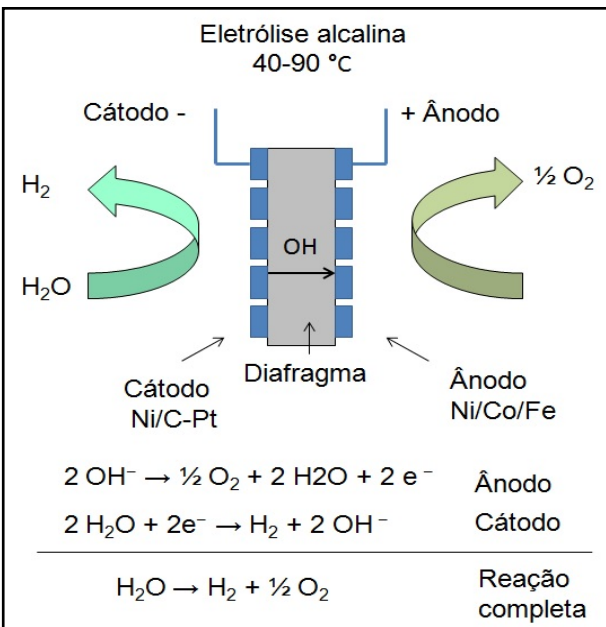
Compatibilidade ambiental do hidrogênio

Redução das emissões do sector de transporte



Emissões de CO₂ do setor de transporte

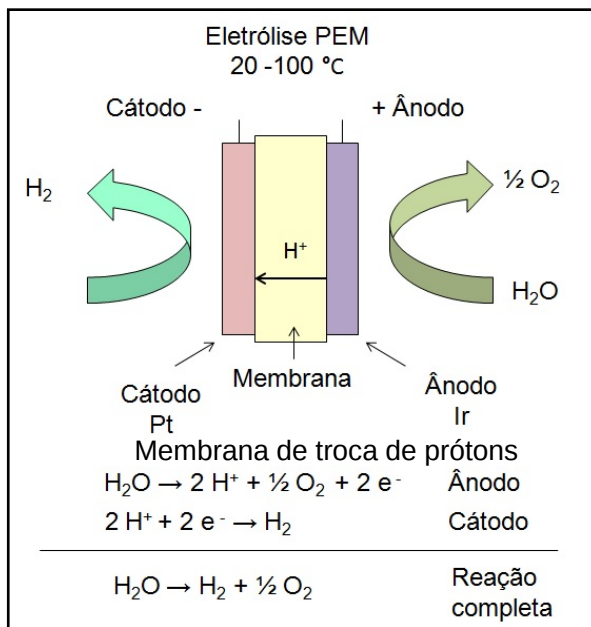
3. Estado da arte da tecnologia



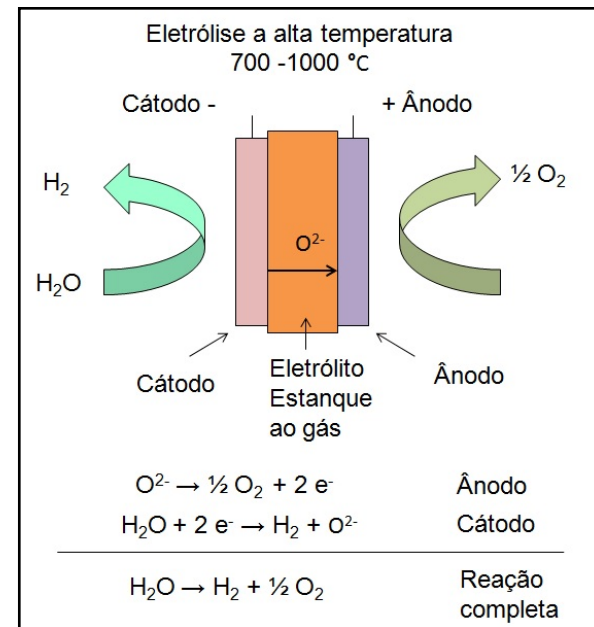
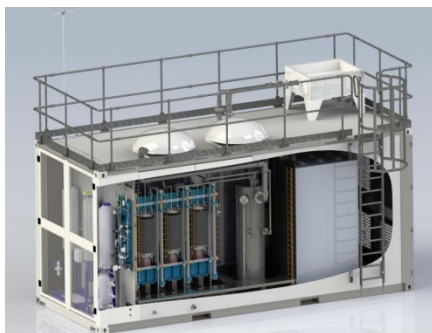
Electrólito alcalino
Iões hidróxido (OH⁻) através do diafragma



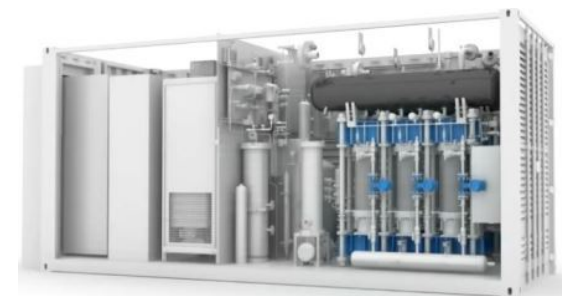
Fonte:
Hydrogenics
e ITM



Electrólito ácido (a própria membrana)
Fluxo de prótons



Electrólito de óxido sólido
Fluxo de superóxido (O²⁻)



Comparação das tecnologias de eletrólise de água

Eletrólise alcalina

Vantagens

- Tecnologia madura e resistente
- Alta esperança de vida
- Menos custos de investimento (-5 ... 20%)

Desvantagens

- Menor densidade de corrente
- Capacidade de carga parcial



Hydrogenics stack alcalino 10 bar



McPhy Eletrólise alcalina, atm.

Eletrólise PEM

Vantagens

- Alta densidade de corrente
- Design mais compacto e espaço reduzido
- Sem circuito de eletrólito alcalino cáustico
- Maior capacidade de carga parcial

Desvantagens

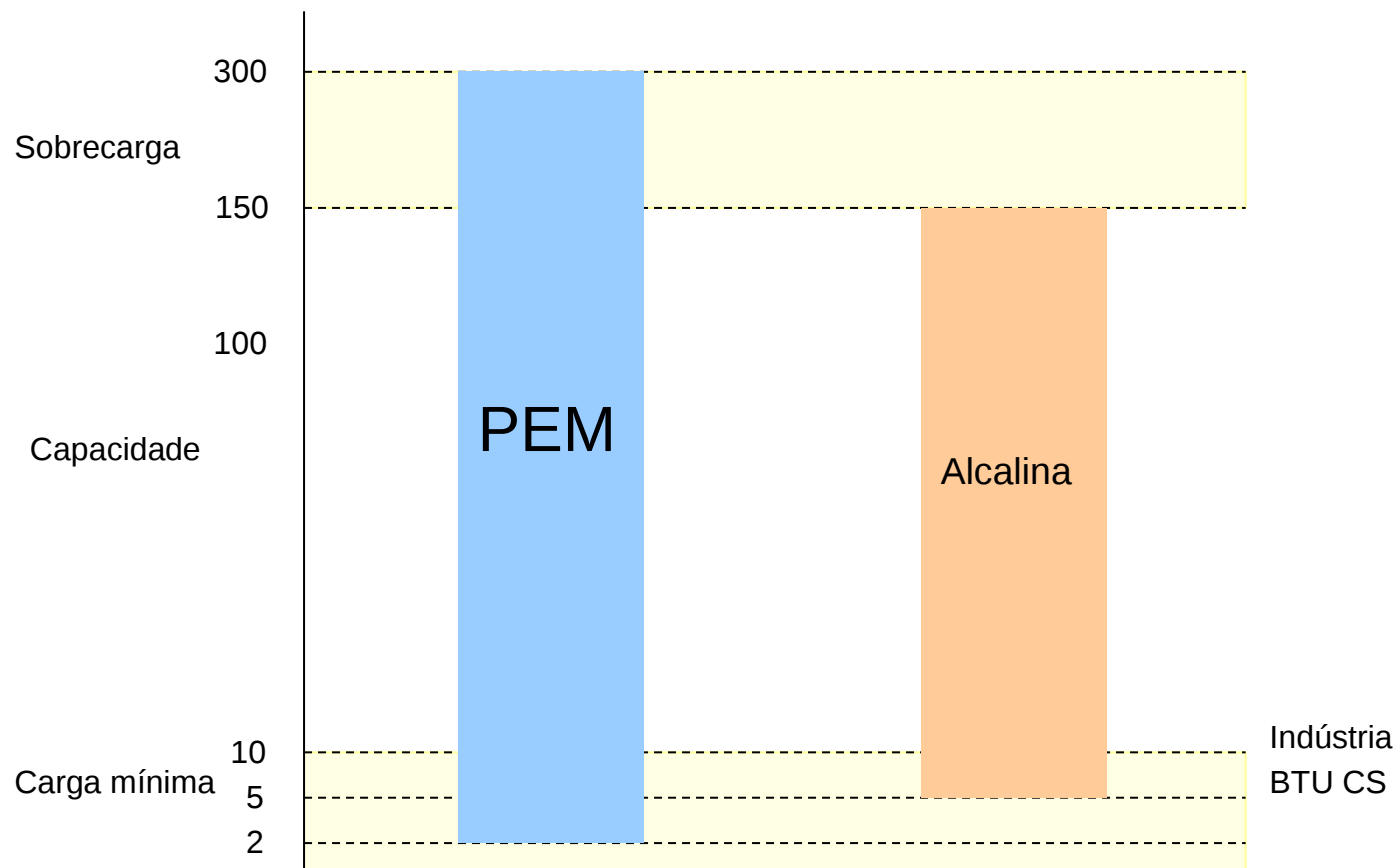
- Custos de investimento mais elevados
- Degradação do stack



Hydrogenics stack PEM

Comparação das tecnologias de eletrólise de água

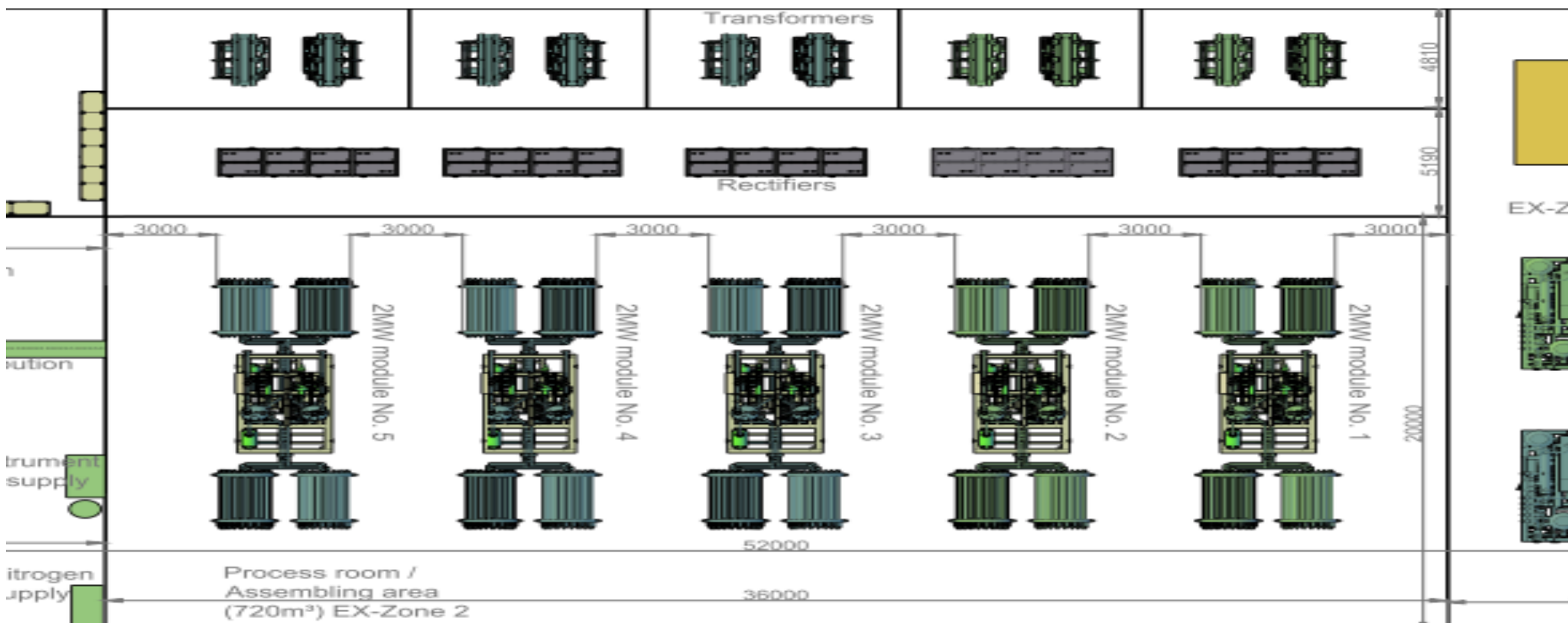
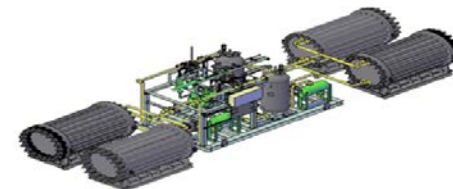
Flexibilidade na operação



Tecnologias modulares para projetos de grande porte

Exemplo: Configuração de 10 MW

2 MW
Mc 400

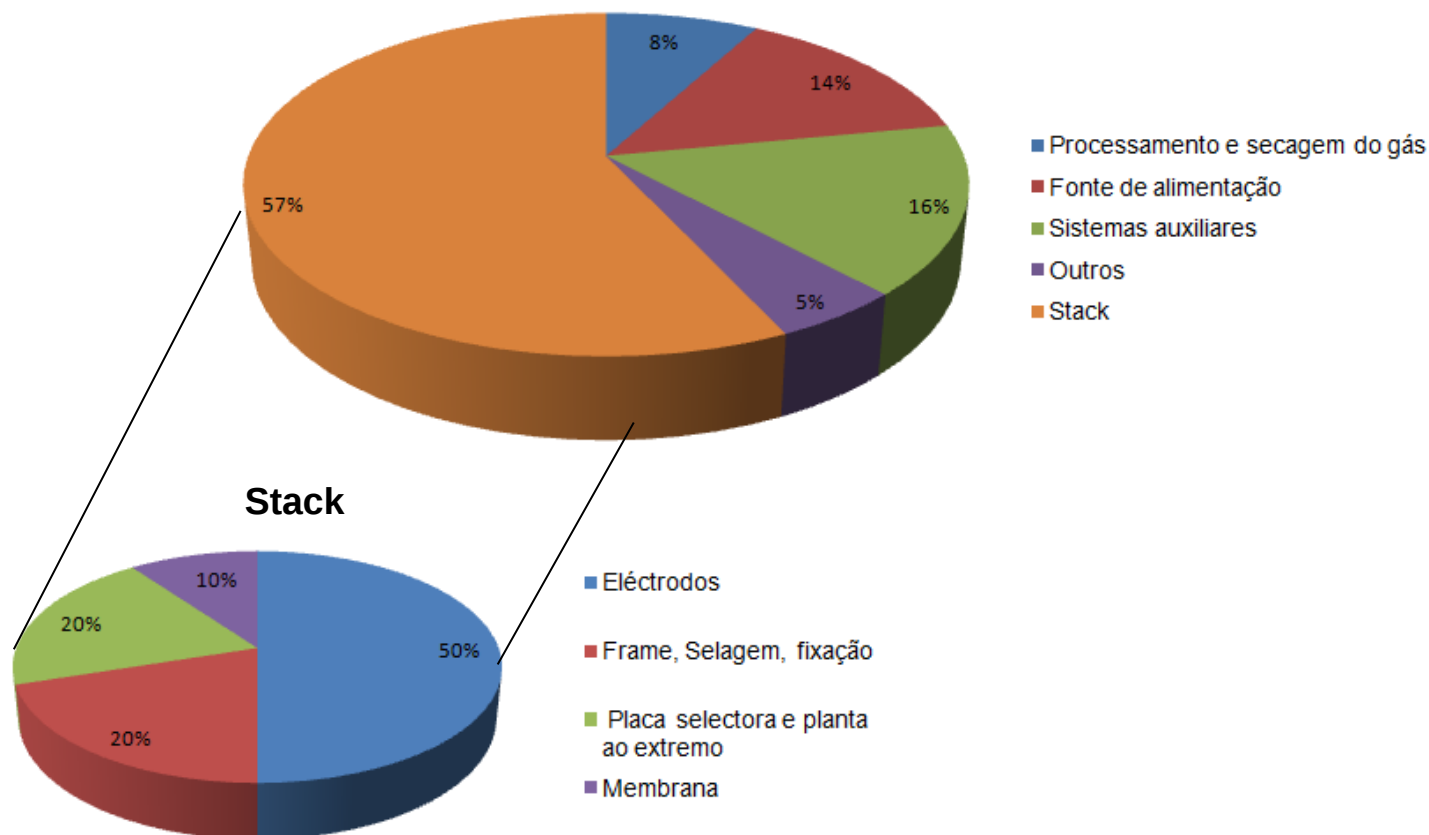


Fonte: Mcphy

2.000 Nm³/h H₂

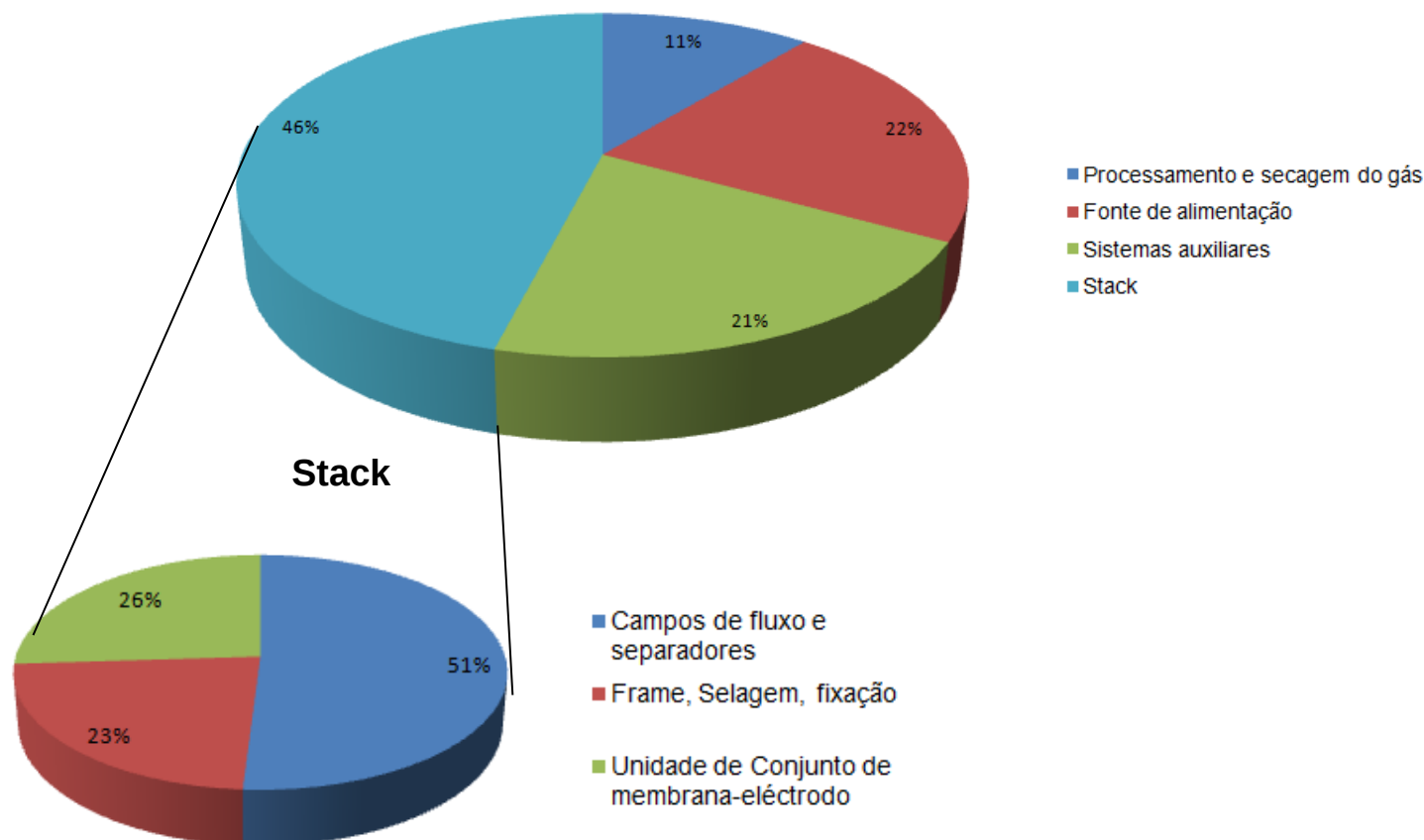
Requisitos de espaço: 60 m x 40 m

Custos de uma instalação de eletrólise alcalina



Fonte: G. Saur, NREL

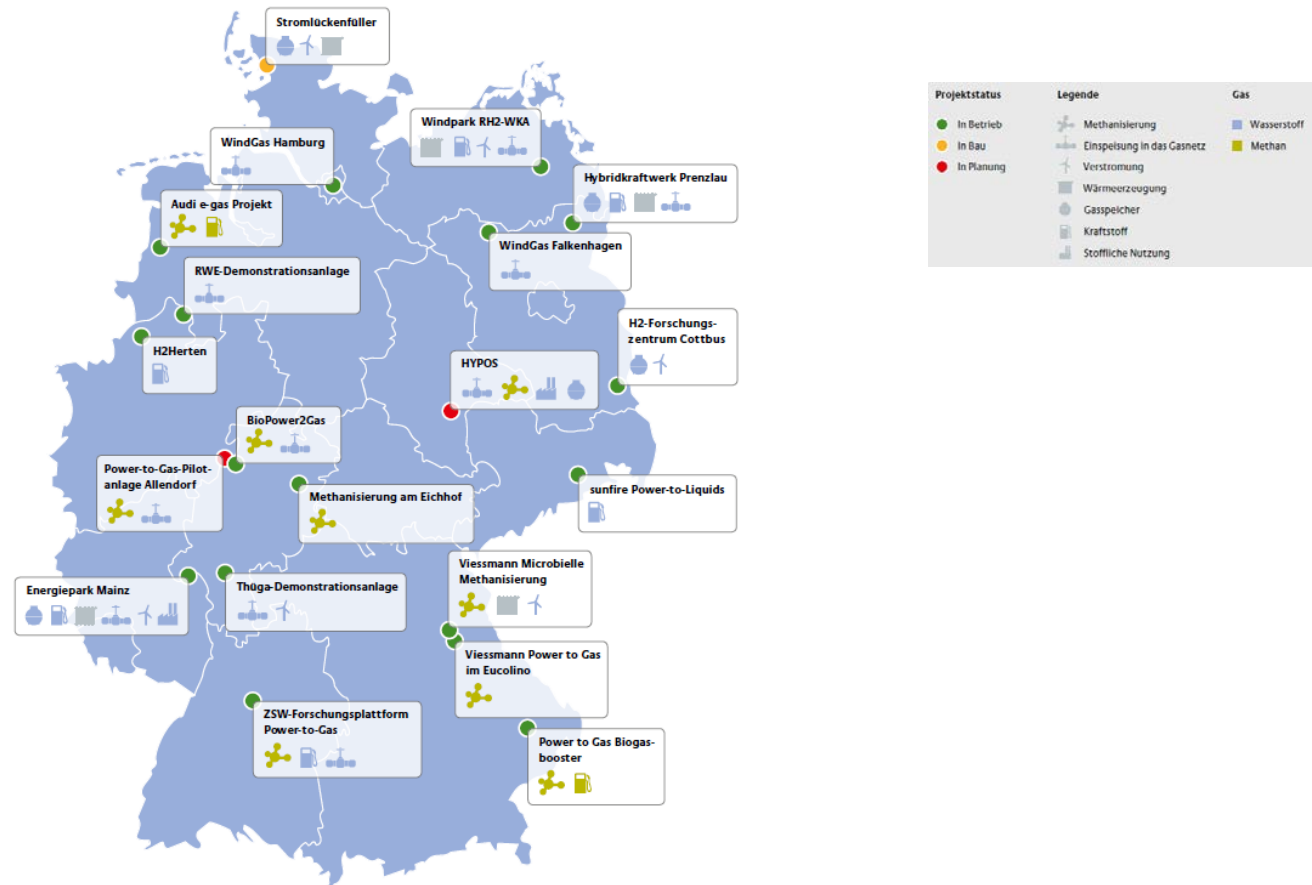
Custos de uma instalação de eletrólise PEM



Fonte: G. Saur, NREL

4. Exemplos de projetos e experiência na Alemanha

Na Alemanha, vários sistemas piloto e de demonstração estão em operação ou planejamento



Centro de pesquisa de hidrogênio e armazenamento da BTU Cottbus-Senftenberg / CEBra

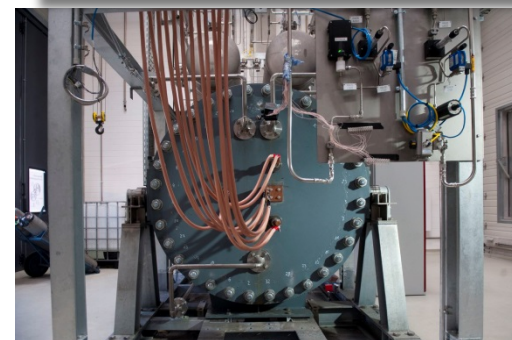
Desenvolvimento, aquisição, montagem e comissionamento de sistemas para a construção do centro de pesquisa de hidrogênio e armazenamento

➤ Integração das energias regenerativas

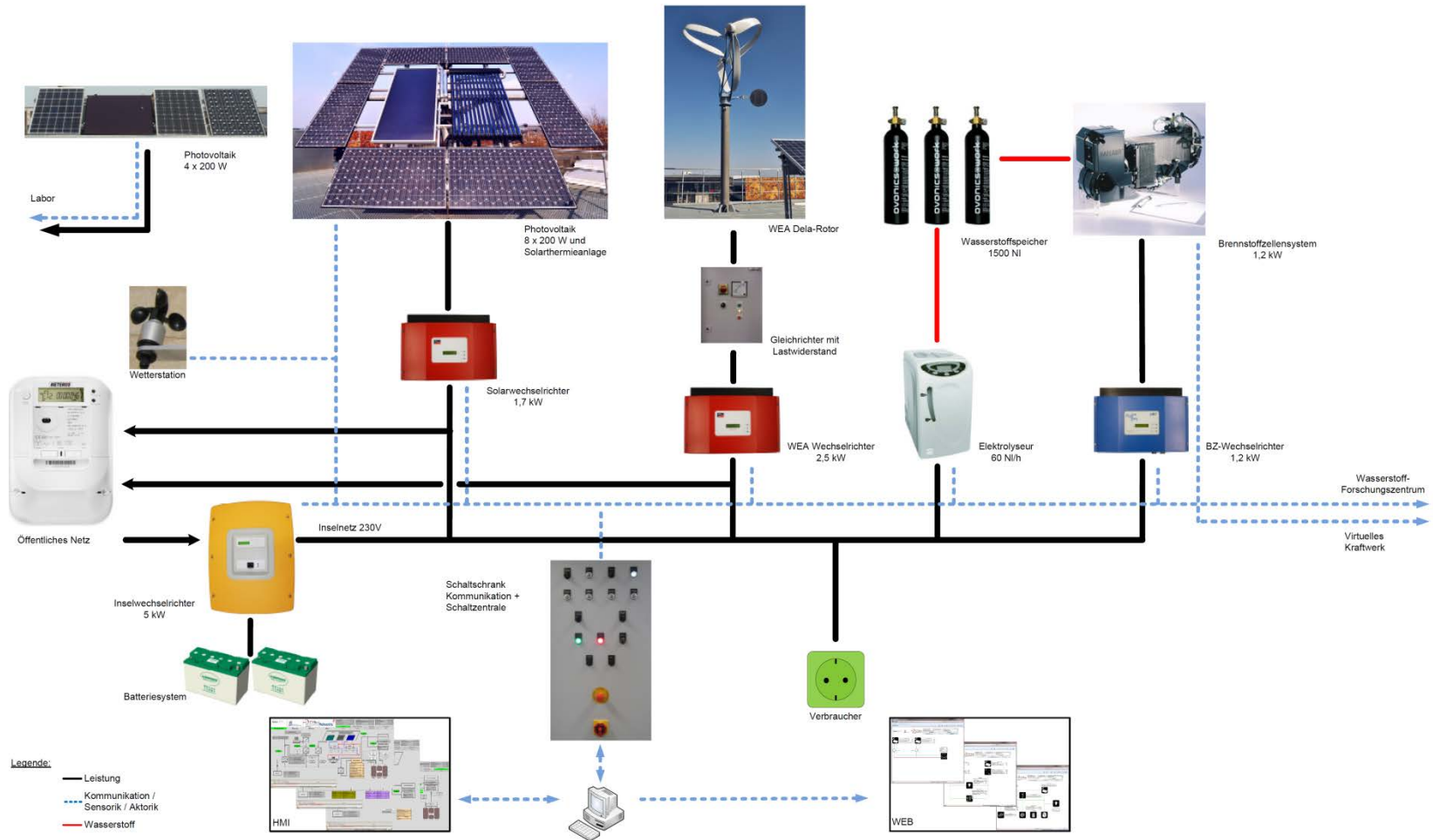
- Demonstração da interação de diferentes componentes para construir sistemas de fornecimento de energia autônomos com opções de feed-in ou como sistemas isolados.
- Base para o desenvolvimento de novos conceitos de oferta e feed-in para energias renováveis como parte de projetos de P&D para implementação conjunta com empresas regionais de energia

➤ Protótipo de célula de eletrólise

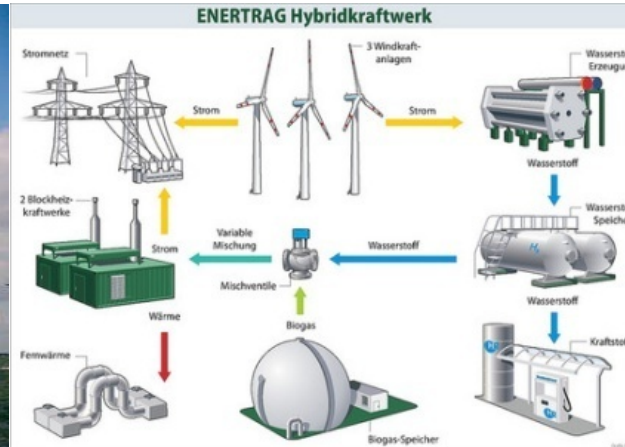
- Possibilidade de geração de eletricidade a partir do vento com previsão e agendamento de carga (em conexão com as previsões meteorológicas)
- Planta para a geração de hidrogênio



Planta piloto para a integração de energias renováveis: BTU Cottbus-Senftenberg



WESpe: Armazenamento de Energia Eólica: BTU C-S



Armazenamento de energia eólica

Desenvolvimento de métodos para avaliação
de locais potenciais

Avaliação de componentes

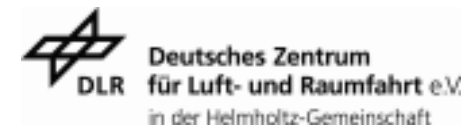
Requisitos para armazenamento geológico

Modelagem funcional

Proteção ambiental e climática

Pesquisa de aceitação e transparência

Análise do sistema e avaliação econômica



Referências em operação: H₂BER (Berlim) - 2014

Sistema de hidrogênio: eletrólise + armazenamento de estado sólido

Estação de
reabastecimento de
combustível operada
por Total

Localizada no
"Aeroporto de Berlim"

Comissionamento:
Maio de 2014



**McLyzer 250 kg/day
42 bar system Electrolyzer**



**McStore 100: 100 kg/day Metal Hydride
(3,3 MWh)**



Fonte: McPhy

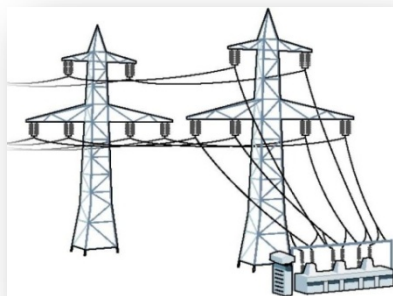


Geração de hidrogênio a partir de fontes de energia renováveis: BTU C-S



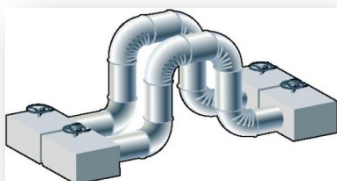
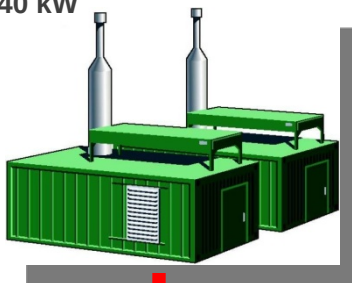
Conceito para a integração de energia regenerativa nas redes elétricas e de gás natural Uckermark

Subestação Bertikow diretamente na rede 220 kV

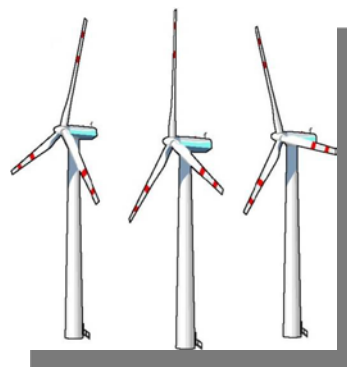


$P_{el.} = 350 \text{ kW}$
 $P_{therm.} = 340 \text{ kW}$

Energia



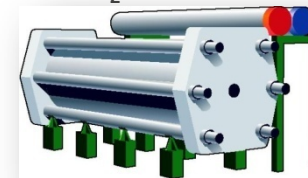
3 plantas cada uma com potência nominal de 2 MW



corrente elétrica

corrente elétrica

Eletrolisador de 500 kW; 120 Nm³/h H₂;
Pureza do H₂ = 4.0



H₂



H₂

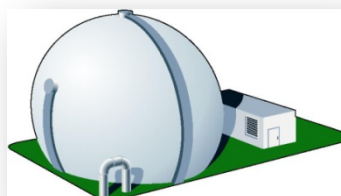


Mistura de Gases
(Gás Natural)



H₂

Biogás



Produção combinada de calor e electricidade

Fonte: ENERTRAG

Energiepark Mainz

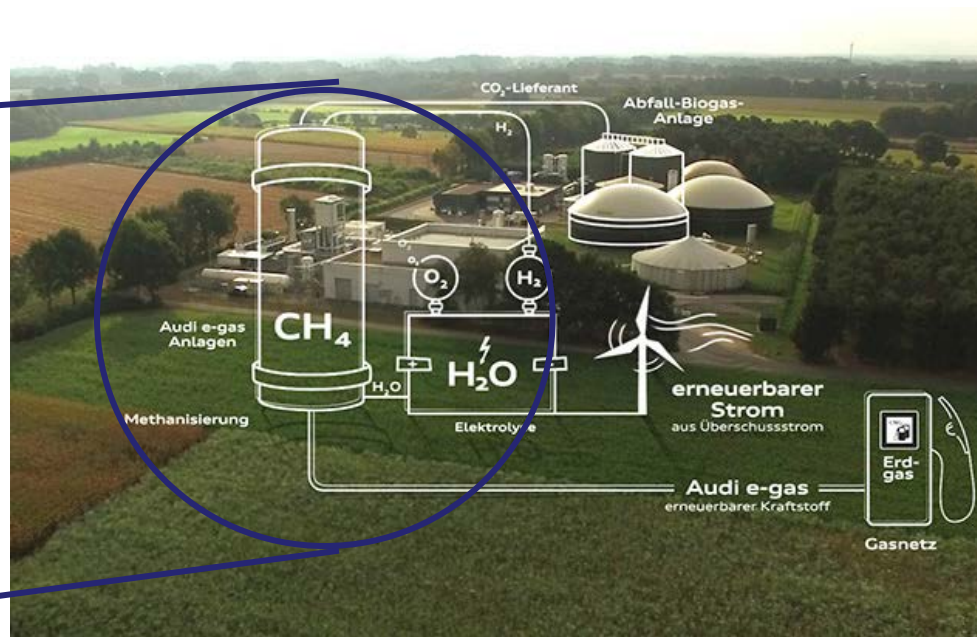


- Eletrólise-PEM: 3 x1,3 MW
- Alimentação direta de H₂ nos gasodutos de distribuição (0,7-0,9 bar) e de transmissão (50-60 bar)
- Enchimento de reboque (200 bar)

Combustíveis	Valor calorífico (in MJ/kg)	Valor calorífico (in MJ/m ³)
Hidrogênio	119,972	10,783
Gás natural	32...45	31...41
Metano	50,013	35,883

Fonte: Energiepark-mainz.de

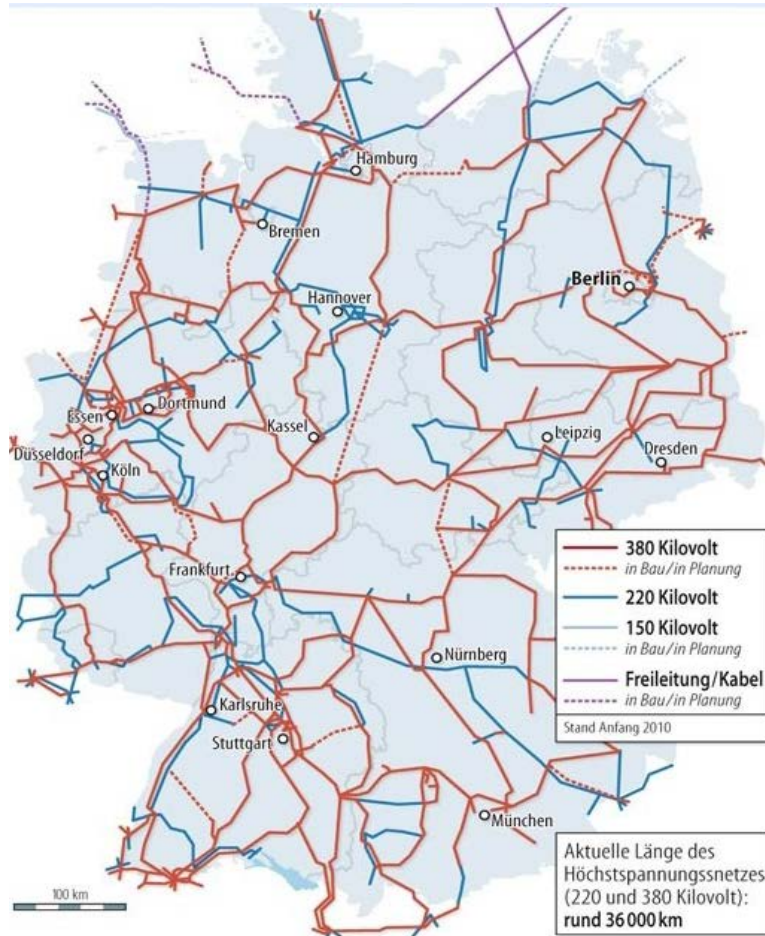
Projeto Audi e-Gas, Werlte



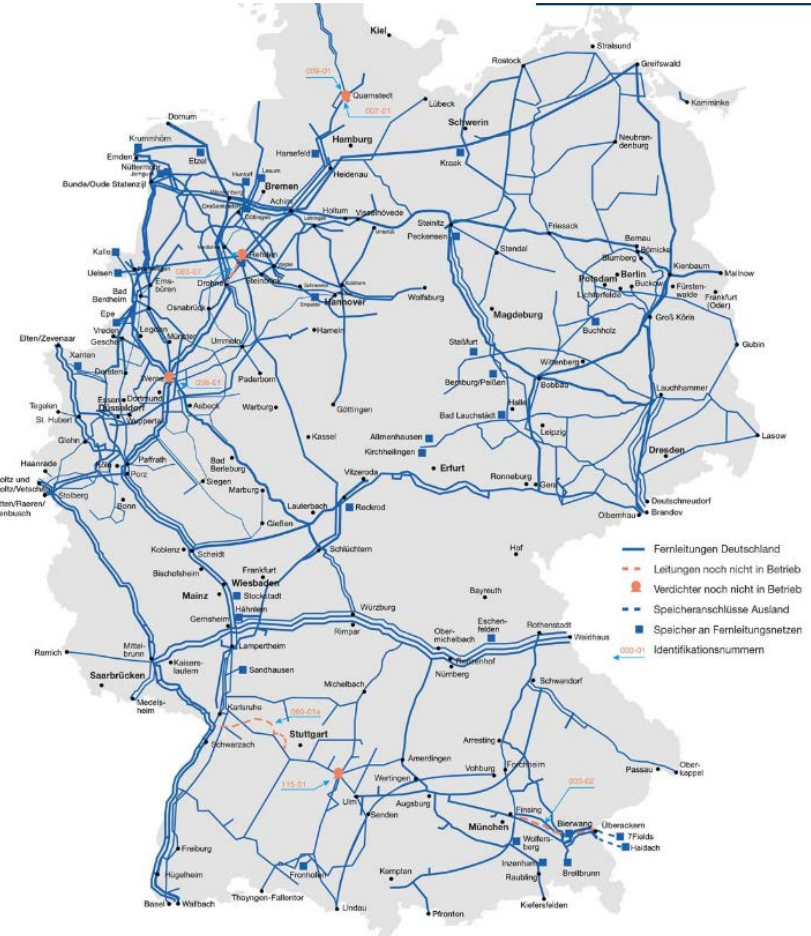
Fonte: ETOGAS

- Eletrólise Alcalina de 6MW
- Metanação com CO₂ de uma planta de biogás
- Utilização do calor residual da metanação para o processo de fermentação
- Injeção direta de SNG (Gás Natural)

Rede de transmissão e gasoutos na Alemanha

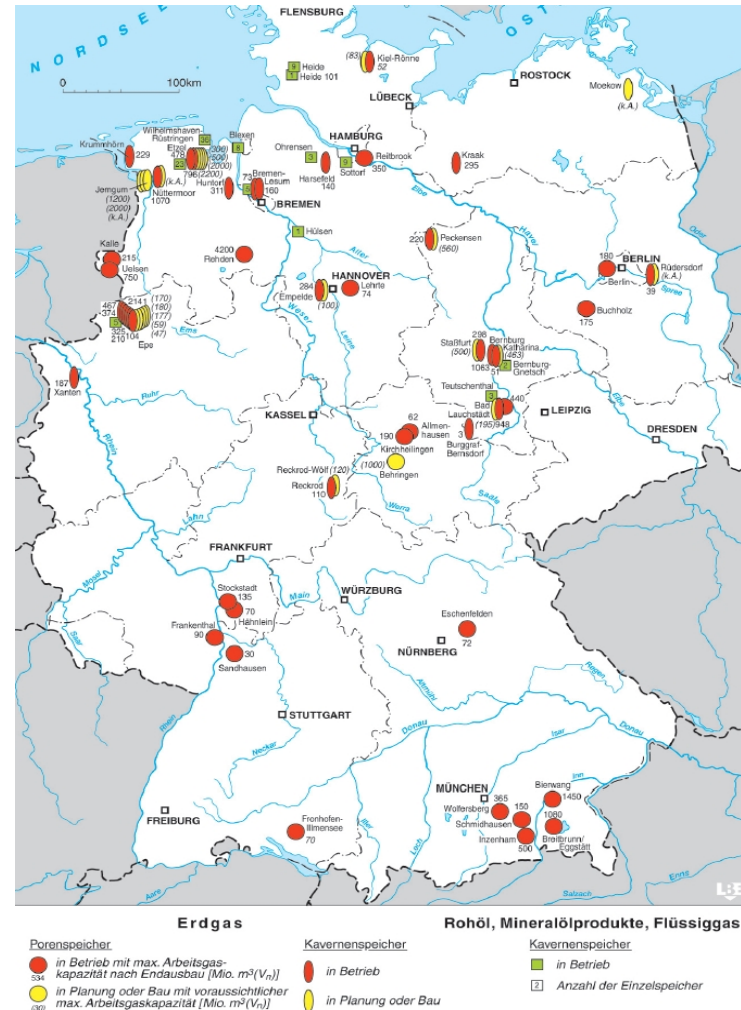


Fonte: Forum Netztechnik Netz Betrieb im VDE



Fonte: BMWi

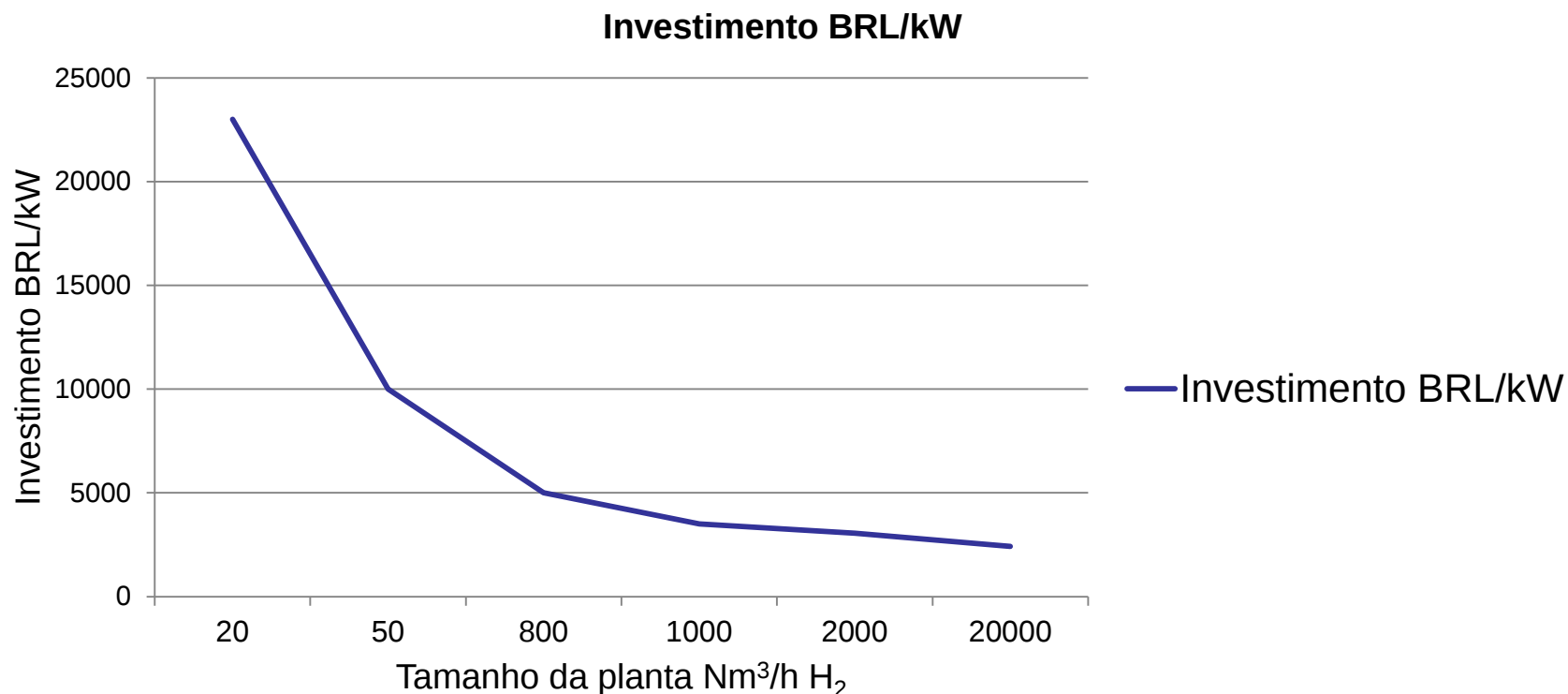
Possibilidades de armazenamento geológico



Fonte: DVGW

5. *Desenvolvimento dos aspectos econômicos da tecnologia*

Declínio dos custos a partir do tamanho da planta

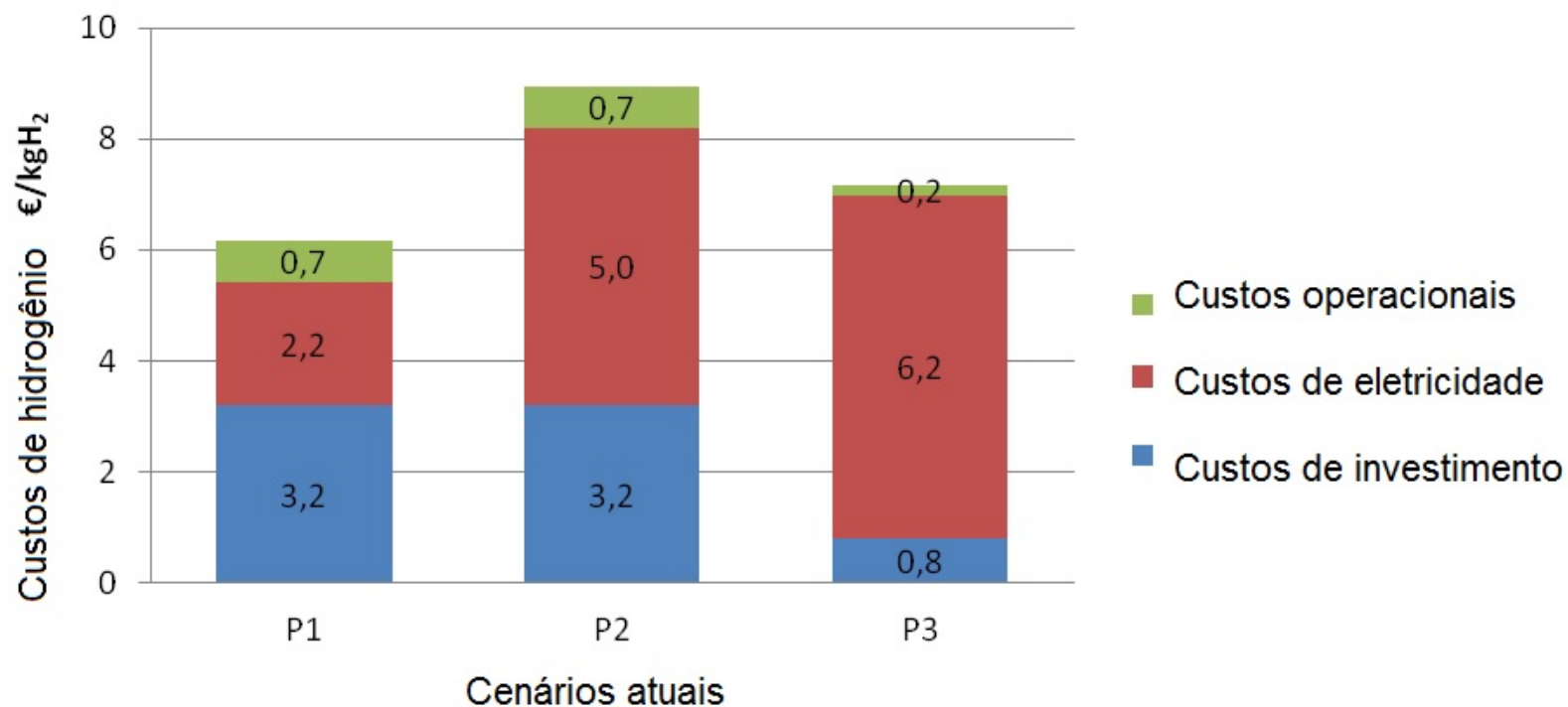


(Usando a taxa de câmbio da primeira semana de Março de 2018)

Aspectos econômicos e oportunidades de mercado

Em relação à rentabilidade da tecnologia “Power to Gas”, os critérios mais importantes são **os custos da energia elétrica, de investimento e de manutenção das plantas de geração de hidrogênio e as possibilidades de rendimento em vários mercados.**

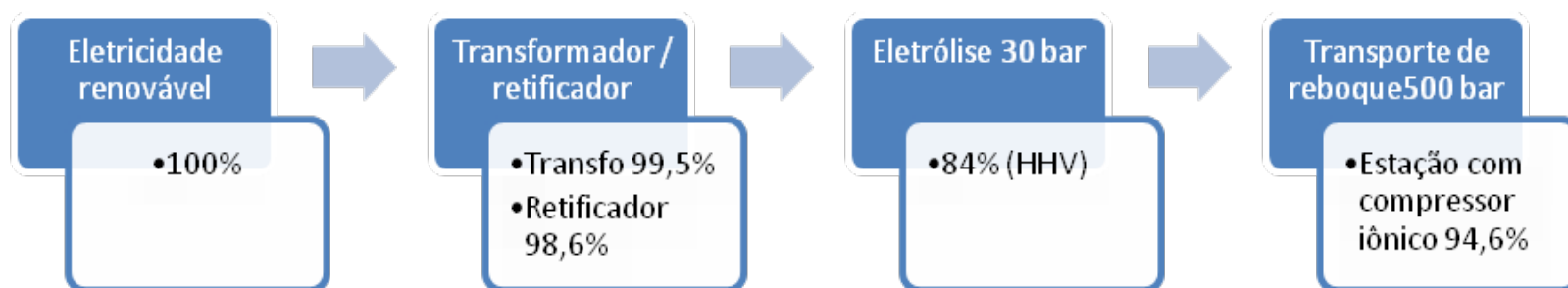
Diferentes cenários foram desenvolvidos variando o preço da eletricidade e o número de horas de operação em plena capacidade. Nos cenários atuais P1, P2, os preços da eletricidade de 4 € ct/kWh ou 9 € ct/Wh foram definidos a partir de turbinas eólicas com 2000 horas de serviço anual. Aqui presume-se que a eletrólise é acoplada diretamente ao parque eólico, e nenhuma outra perda é incorrida. O cenário P3 combina um preço de mercado mais elevado para a energia elétrica de 11€ ct/kWh com um alto número de horas de operação de 8000 por ano.



Custos de geração de hidrogênio para os cenários atuais P1, P2 e P3

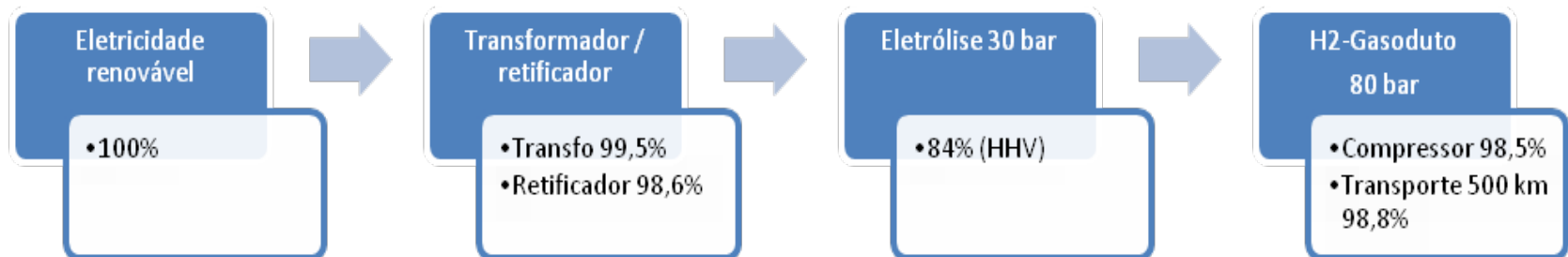
6. *Eficiência da cadeia de conversão*

Nesta rota, assume-se que a eletrólise está localizada diretamente na fonte de energia renovável e já fornece hidrogênio a uma pressão de 30 bar. Em uma estação de enchimento, o hidrogênio é comprimido para 500 bar e é enchido em caminhões. Este nível de pressão corresponde ao estado da arte.



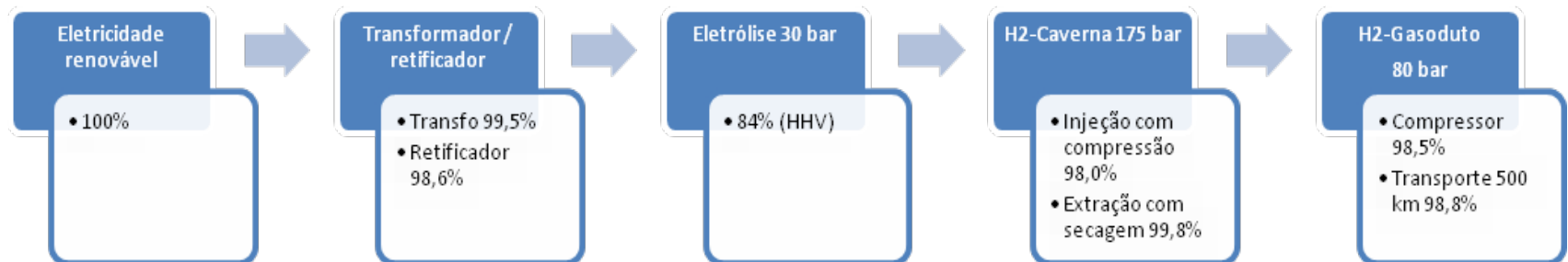
Fornecimento direto de hidrogênio via transporte por veículos
Eficiência total $\eta = 78,0\%$

A rota usa uma rede de gás H_2 em vez do transporte por veículos. A pressão da linha de hidrogênio de 80 bar corresponde à de uma linha de transporte para altas taxas de fluxo. Dados para transporte de rede de gás H_2 .



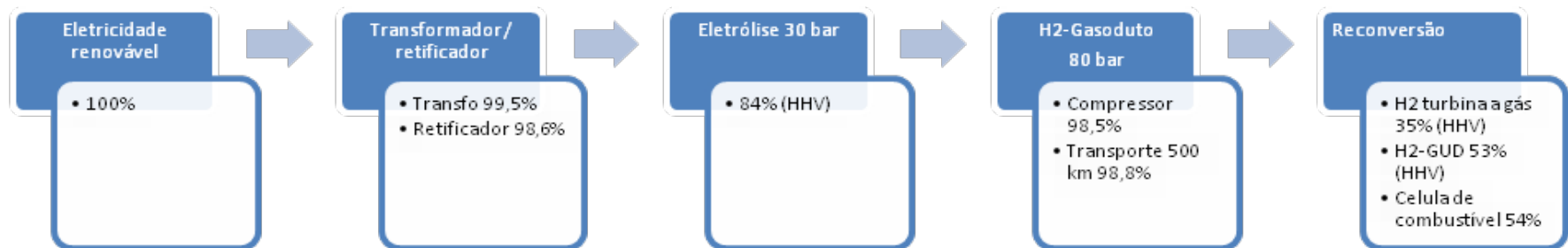
Fornecimento de hidrogênio com transporte através de gasodutos de H_2 ,
Eficiência total $\eta = 80,2\%$

Para quantidades muito grandes de produção de hidrogénio, e para o armazenamento a longo prazo, o armazenamento pressurizado numa caverna subterrânea é viável. As cavernas típicas têm um tamanho geométrico de 500.000 m³ e são operadas a uma pressão de aproximadamente 60 a 175 bar. Isso corresponde a uma capacidade máxima de hidrogênio de aproximadamente 57 milhões de Nm³.



Fornecimento de hidrogênio com armazenamento em cavernas e transporte através de rede de gás de H₂, eficiência total $\eta = 78,4\%$

Para a reconversão com o hidrogênio, três opções são assumidas. O uso direto de uma célula de combustível, uma turbina de gás com hidrogênio e uma planta de H₂-CCGT (Turbina de Ciclo de Gás Combinado) são consideradas. Em todos os casos, a eficiência está novamente relacionada ao HHV.



Provisão de hidrogênio com transporte via gasoduto de H₂ para reconversão

Eficiência geral com turbina a gás $\eta = 28,1\%$,

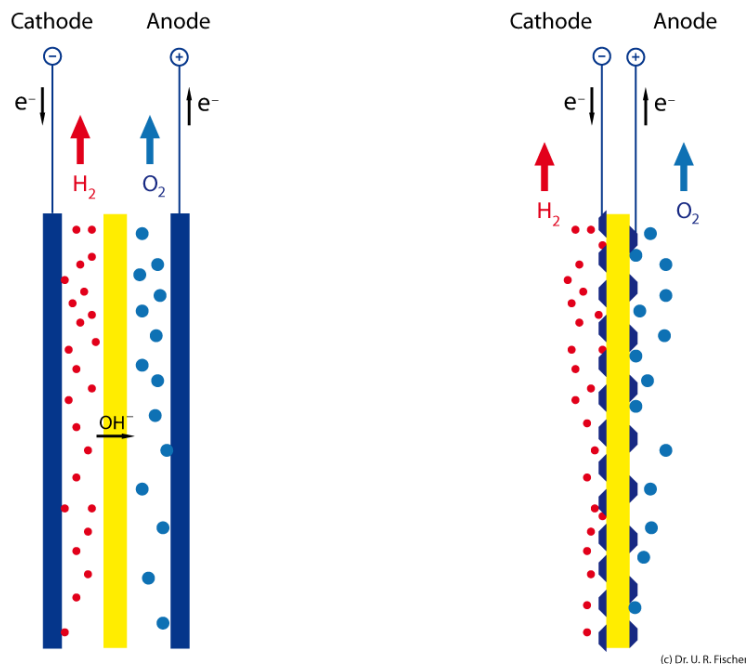
Eficiência geral com CCGT $\eta = 42,5\%$,

Eficiência total com células de combustível $\eta = 43,3\%$

7. Aspectos principais da pesquisa

Eletrólise alcalina - Design de células e eletrodos

- Maior resistência eletrolítica
- As borbulhas de gás na superfície do eletrodo aumentam a resistência
- Densidade da borbulha aumentando com altura
- Densidade de corrente não uniforme
- Diâmetro das borbulhas
 - O_2 : 500 μm
 - H_2 : 20-30 μm



Conventional geometry

Zero-gap geometry

Micro – gap

- Espaçamento entre eletrodo perfurado e membrana : 0,2-1,5mm
- Espaçamento entre eletrodo perfurado e níquel - folha separadora : ca. 7-10mm

- Menor resistência
- Perigo de curto-circuito se danificar a membrana
- Evolução da borbulha principalmente em bordas de furos
- Os orifícios devem ser pequenos para a área da borda grande
- Buracos devem ser suficientemente grandes para permitir o desprendimento de borbulhas
- Diâmetro dos furos:
 - Anode: 1200 μm
 - Cathode: 300 μm

Sources: Fischer, J. Hofmann, H. Luft, G. and Wendt, H. (1980) fundamental investigations and electrochemical engineering aspects concerning an advanced concept for alkaline water electrolysis. *AIChE J.* 26 (5) 794-802.
Wendt, H. (1984) Neue konstruktive und prozesstechnische Konzepte für die Wasserstoff-Gewinnung durch Elektrolyse. *Chem.-Ing.Tech.* 56 (4), 265.272.

Aspectos principais na pesquisa de eletrólise-PEM

- Desenvolvimento de melhores eletrocatalisadores com baixa taxa de degradação no ambiente áspetro oxidativo do eletrólise PEM
- Desenvolvimento de eletrocatalisadores mais baratos com menor PGM (metais do grupo da platina) carregando
- Substituição de materiais caros por colectores de corrente e materiais de placas bipolares (titânio) por alternativas mais baratas (por exemplo, aço inoxidável revestido)
- Diminuição do custo total da eletrólise da PEM pela produção em massa
- Aumento da pressão do sistema
- Desenvolvimento de pressão-eletrólise com design desequilibrado (apenas lado catódico pressurizado)

